International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)
Peer-Reviewed Journal
ISSN: 2349-6495(P) | 2456-1908(O)
Vol-8, Issue-10; Oct, 2021
Journal Home Page Available: https://ijaers.com/
Article DOI: https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.810.26

Characterization of the Elastic and Mechanical Properties of 1020 Steel with the Ultrasonic Transparency Technique

Caracterização das Propriedades Elásticas e Mecânicas do Aço 1020 com a Técnica Ultrassônica da Transparência

Álvaro Barbosa de Carvalho Júnior[1], Maurílio José Inácio[2], Mikaella Pricila Alves Dias[3] Maria Helena Teles Lopes[4], Ana Caroline Nery Munoz Carvalho[5], Samara Guedes Ramos[6]

[1]Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual de Montes Claros, Brasil
[2]Departamento de Ciências da Computação, Universidade Estadual de Montes Claros, Brasil
[3,4,5,6]Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas, Universidade Estadual de Montes Claros, Brasil

Received: 11 Sep 2021,

Received in revised form: 11 Oct 2021,

Accepted: 18 Oct 2021,

Available online: 24 Oct 2021

***Keywords*— Ultrasonic, Elastic Properties, Steel.**

Abstract* — *In certain industrial applications it is important to characterize quickly the elastic and mechanical properties of metals. However, these measurements are usually carried out by means of mechanical tests, which demand time and samples destruction. Ultrasonic testing is a non-destructive and alternative method, which can be used to measure the elastic and mechanical properties of metals with relatively accuracy. In this study, the transmission ultrasonic technique was used to characterize a 1020 carbon steel bar. The results obtained were compared with reference values found in the literature, attesting the feasibility of a fast and low cost method to investigate low carbon steels.

I. INTRODUÇÃO

Os ensaios não destrutivos (END's), como por exemplo, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, gamagrafia e ensaio por ultrassom, são técnicas capazes de inspecionar um material sem a necessidade de destruí-lo ou danificá-lo. Geralmente, os END's são utilizados para verificar a condição de integridade dos materiais por meio da detecção de descontinuidades ou falhas que possam comprometer o funcionamento da peça ou do produto final. Uma vez detectadas, as falhas podem ser caracterizadas em relação à sua localização, tamanho, orientação, forma e natureza [1, 2, 3].

Os END's também podem ser utilizados para a caracterização de materiais, sendo o ensaio por ultrassom uma das técnicas mais conhecidas. Esse tipo de ensaio se destaca pela possibilidade de relacionar as medidas de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas com algumas propriedades físicas e mecânicas dos materiais, entre elas, os módulos de elasticidade, cisalhamento e compressibilidade, o coeficiente de Poisson, a impedância acústica, o fator de anisotropia e a dureza [1, 4-7].

Na indústria, medidas de densidade e de velocidades de ondas ultrassônicas de modo longitudinal e transversal, podem ser utilizadas para a estimativa rápida das propriedades elásticas de ligas metálicas. Isto porque os resultados encontrados por meio de um único ensaio não destrutivo são muito próximos daqueles que seriam obtidos com a realização de testes destrutivos convencionais [8-10]. Entretanto, a maioria das empresas ligadas ao setor industrial ainda utilizam ensaios

destrutivos para a caracterização dos seus produtos. Neste caso, com a dificuldade de caracterizar as propriedades mecânicas utilizando um único ensaio, será indispensável a realização de outros ensaios destrutivos, como por exemplo, testes de tração, compressão, cisalhamento, torção e flexão.

Acredita-se que muitas indústrias não utilizem o ensaio por ultrassom para a investigação de materiais pelo completo desconhecimento da técnica e também pelo custo adicional com instrumentação e qualificação de um operador habilitado para o ensaio. Por outro lado, com o avanço do conhecimento na instrumentação eletrônica, dispositivos de baixo custo em relação aos equipamentos industriais e com alto grau de confiabilidade das medidas, podem ser desenvolvidos e aplicados no estudo das propriedades elásticas de materiais metálicos e não metálicos [5, 11, 12].

Entre os métodos ultrassônicos para caracterização e inspeção de materiais metálicos destacam-se os métodos de pulso-eco e da transparência [1, 2, 11]. O método de pulso-eco utiliza um único transdutor, capaz de gerar e receber ondas ultrassônicas através do material. Por outro lado, na técnica da transparência são utilizados dois transdutores separados, posicionados nas faces opostas do material, sendo um deles responsável por gerar e o outro por captar as ondas ultrassônicas [1, 2].

Recentemente, um grupo de pesquisadores do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas, da Universidade Estadual de Montes Claros (PPGMCS/UNIMONTES), investigou a possibilidade de caracterização não destrutiva de ligas metálicas com a técnica ultrassônica da transparência. Com o desenvolvimento de um sistema eletrônico simples, de emissão e recepção de sinais ultrassônicos, constatou-se a viabilidade do método com a obtenção de resultados satisfatórios em amostras de alumínio e magnésio, cujos valores foram muito semelhantes àqueles obtidos com ensaios destrutivos convencionais [12]. Entretanto, a viabilidade do método ainda era desconhecida para o estudo de ligas metálicas ferrosas como o aço.

Portanto, com base nos relatos descritos acima, este trabalho buscou caracterizar as propriedades elásticas e mecânicas do aço 1020, utilizando o sistema eletrônico de ultrassom desenvolvido no PPGMCS/UNIMONTES. O aço 1020 foi escolhido por representar uma das ligas mais utilizadas em estruturas metálicas, além de ser um dos principais insumos para a produção de pregos, parafusos, chapas e tubos, sendo suas propriedades elásticas bastantes conhecidas e relatadas na literatura.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Características e composição química da amostra

Para a realização deste estudo foi adquirida comercialmente uma barra de aço ABNT/SAE 1020, homogênea, na condição normalizada, procedente da empresa Gerdau. A barra de aço 1020 possui dimensões aproximadas de 0,01876 m de diâmetro e 0,20159 m de comprimento. As dimensões da barra foram aferidas com o auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,005 mm. Na Tabela 1 encontra-se a composição química do aço SAE 1020 disponibilizada no catálogo técnico do fornecedor [13].

Tabela. 1: Composição química da barra de aço SAE 1020

Composição química (%)				
Aço	C	Mn	P (máx)	S (máx)
SAE 1020	0,18-0,23	0,30-0,60	0,030	0,050

Fonte: [13]

O volume (V_{barra}) da barra foi calculado a partir do raio (r) e comprimento (c), utilizando a Equação 1:

$$V_{barra} = \pi r^2 c \quad (m^3) \qquad (1)$$

A massa da barra foi aferida utilizando uma balança digital com resolução de 0,01 g. Assim, a densidade (ρ) foi calculada por meio da razão entre a massa (m) e o volume (V_{barra}), de acordo com a Equação 2:

$$\rho = m/V_{barra} \quad (kg/m^3) \qquad (2)$$

A densidade calculada para a barra de aço 1020 foi considerada uniforme, uma vez que a amostra possui inércia constante e distribuição de massa homogênea.

2.2 Cálculo das velocidades ultrassônicas

Para calcular as velocidades das ondas ultrassônicas propagadas através da barra foram medidos os tempos de percurso das ondas longitudinais com um sistema eletrônico de ultrassom. No sistema eletrônico, que consiste no método ultrassônico da transparência, os circuitos emissor e receptor foram alimentados com fontes simétricas de 30 V e 12 V, respectivamente. O circuito emissor produziu pulsos com amplitude de 60 V e duração de 400 ns (nanosegundos), em intervalos de tempo iguais a 5 ms (milissegundos). Esses pulsos foram produzidos com um transdutor piezoelétrico de ondas longitudinais, modelo AW190, com 0,02 m de diâmetro e frequência igual a 2 MHz. Outro transdutor do mesmo modelo foi utilizado para captar o sinal pulsado no circuito receptor.

O sinal captado no circuito receptor foi amplificado com um amplificador operacional, modelo THS4271D, que foi projetado para funcionar a partir de tensões de alimentação entre ± 5 V a ± 15 V. Na Fig. 1 encontra-se uma imagem dos circuitos eletrônicos emissor e receptor dos sinais ultrassônicos utilizados no método da transparência.
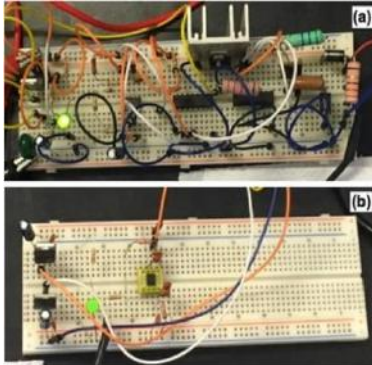
Fig. 1: Circuitos eletrônicos: (a) emissor e (b) receptor de ondas ultrassônicas

É importante ressaltar que o circuito receptor gera na saída um sinal amplificado com ganho pré-definido, diminuindo as interferências que possam prejudicar o processo de medição. Na Fig. 2 estão apresentados os transdutores alinhados nas extremidades da barra de aço 1020. Antes das medidas, as extremidades da barra foram limpas com lã de aço para remover resíduos provenientes de oxidação. O material utilizado como acoplante entre os transdutores e as extremidades da barra foi a vaselina em pasta, com valor de impedância acústica Z_{acop} = 1,5 x 10^6 kg/m^{2}s e densidade ρ_{acop} = 905 kg/m^3.
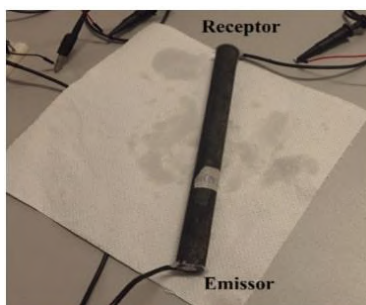
Fig. 2: Posicionamento dos transdutores para emissão e recepção das ondas ultrassônicas

A escolha do acoplante deve considerar o acabamento superficial da amostra, o tipo de material, a forma da peça e a posição em que será realizado o ensaio. Portanto, a vaselina em pasta foi escolhida como acoplante por apresentar boa aderência e viscosidade, que contribuiram para a fixação dos transdutores, uma vez que a barra possuía diâmetro um pouco menor (d_{barra}= 0,01876 m) do que o diâmetro do transdutor ($d_{trans.}$= 0,02 m). Testes preliminares realizados com outros tipos de acoplantes, como a glicerina e o mel de abelha, não foram satisfatórios, tendo em vista a baixa aderência desses acoplantes e as condições do experimento.

As medidas dos sinais fornecidos na saída do circuito receptor foram feitas com um osciloscópio digital, da marca Tektronix, modelo TBS1062. O osciloscópio foi conectado a um computador para exportação dos dados e captura das imagens dos sinais com o programa *OpenChoice Desktop*. A medida de tempo em microssegundos (µs) entre a onda ultrassônica emitida e recebida através da barra foi feita na tela do osciloscópio, como ilustrado na Fig. 3.

Fig. 3: Tempo de percurso da onda ultrassônica através da barra de aço 1020

A distância entre as linhas verticais apresentadas na tela do osciloscópio representa o tempo gasto pela onda ultrassônica para percorrer o comprimento da barra. Desta forma, para a estimativa da velocidade média de propagação da onda longitudinal (V_L) foi utilizada a Equação 3:

$$V_L = c/t \quad \text{(m/s)} \qquad (3)$$

em que:

c = comprimento da amostra (m);

t = tempo (s)

O valor médio de V_L foi calculado a partir de três medidas do tempo de percurso, obtidas com a remoção e o reposicionamento dos transdutores nas extremidades da barra de aço 1020.

Para a maioria dos materiais metálicos a razão entre as velocidades ultrassônicas de modo transversal e longitudinal é de aproximadamente 0,50 [1]. Assim, para estimar o valor da velocidade da onda ultrassônica de modo transversal (V_T) foi utilizada a razão V_T/V_L, obtida a partir dos valores de referências da Tabela 2.

Tabela. 2: Velocidades ultrassônicas no aço 1020

Referência	V_L (m/s)	V_T (m/s)	V_T/V_L
[14]	5890	3240	0,550
[15]	5899	3237	0,549

Portanto, a partir do cálculo da velocidade longitudinal (V_L) foi possível estimar a velocidade da onda ultrassônica transversal (V_T) utilizando a Equação 4:

$$V_T = 0{,}55V_L \text{ (m/s)} \quad (4)$$

2.3 Estimativa das propriedades elásticas

As propriedades elásticas do aço 1020 foram calculadas a partir do valor da densidade (ρ) e das velocidades ultrassônicas de modo longitudinal (V_L) e transversal (V_T). Na Tabela 3 estão apresentadas algumas relações existentes entre as propriedades elásticas e as velocidades ultrassônicas, tais como, módulo de elasticidade (E), módulo de cisalhamento (G), módulo de compressibilidade (K), coeficiente de Poisson (v), impedância acústica (Z) e fator de anisotropia (r).

Tabela. 3: Propriedades elásticas em função de V_L, V_T e ρ

Relação	Referência	Equação
$G = \rho V_T^2$	[16]	(5)
$v = \frac{(V_L^2 - 2V_T^2)}{2(V_L^2 - V_T^2)}$	[17]	(6)
$E = 2G(1 + v)$	[3]	(7)
$K = \rho(\frac{3V_L^2 - 4V_T^2}{3})$	[17]	(8)
$Z = \rho V_L$	[1]	(9)
$r = 3^{1/2}\left(\frac{\rho V_T^2}{\rho V_L^2}\right)^{1/2}$	[7]	(10)

2.4 Estimativa das propriedades mecânicas com ondas ultrassônicas

O limite de resistência à tração (LRT), o limite de escoamento (σ_e), o módulo de resiliência (u_r), a dureza Brinell (HB) e a dureza Vickers (HV), foram estimadas utilizando as relações matemáticas propostas na Tabela 4.

Tabela. 4: Relações propostas para o cálculo das propriedades mecânicas dos aços

Relação	Referência	Equação
$LRT = -7171{,}1 + 1{,}3V_L$	[10]	(11)
$HV = (LRT - 100)/2{,}5$	[18]	(12)
$\sigma_E = 2{,}736HV - 70{,}5$	[19]	(13)
$HB = LRT/3{,}45$	[3]	(14)
$u_r = \frac{1}{2}\frac{\sigma_E^2}{E}$	[3]	(15)

As Equações 11, 12 e 13 foram obtidas por alguns autores após a investigação de diferentes tipos de aço [10, 18, 19]. Neste caso, o uso dessas equações teve como intuito verificar se as relações propostas para outros tipos de aço podem ser aplicadas na caracterização do aço 1020. Por outro lado, as Equações 14 e 15 representam as relações encontradas por meio de ensaios destrutivos convencionais para a maioria dos aços carbono [3].

2.5 Ensaios de tração e dureza *HB*

Para analisar os valores calculados de LRT, HB e σ_e, foram realizados ensaios mecânicos convencionas de tração e dureza. O diagrama tensão-deformação e o valor de dureza *HB* foram obtidos em uma máquina acadêmica de ensaios universal, modelo WP 300, que permite a exportação dos dados para representações gráfica.

Para o ensaio de tração foi produzida uma amostra cortada a partir da barra de aço 1020. Esse corpo de prova foi usinado em dimensões aproximadas de 0,05 m de comprimento e 0,006 m de diâmetro. Essas dimensões não consideram as roscas feitas nas extremidades para fixação do corpo de prova na máquina de ensaio de tração.

As medidas de dureza *HB* foram feitas em um corpo de prova na forma de disco, cortado a partir da seção transversal da barra. O corpo de prova possui dimensões de 0,01876 m de diâmetro e 0,01 m de espessura. O valor médio da dureza foi calculado com três medidas realizadas com indentador esférico de aço que possui diâmetro de 0,01 m e carga de 3000 kgf.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Medida da densidade do aço 1020

Na Tabela 5 encontra-se o valor da densidade calculada para a barra de aço 1020 por meio da razão entre a massa e o volume. O valor obtido para a densidade da barra foi o mesmo relatado na literatura para o aço 1020, que é de

7860 kg/m³ [20]. Entretanto, os valores de densidade do aço 1020 podem variar entre 7840 kg/m³ e 7870 kg/m³, sendo esse fato associado a condição de tratamento do aço 1020, que pode ser laminado, recozido ou normalizado [21-23].

Tabela. 5: Densidade calculada para a barra de aço 1020

Volume (10^{-5} m^3)	Massa (*kg*)	Densidade (*kg/m³*)
5,572	0,438	7860,49
Referência: [20]	-	7860

3.2 Valores calculados das velocidades ultrassônicas

Na Tabela 6 estão apresentados os valores calculados das velocidades longitudinal (V_L) e transversal (V_T) para a barra de aço 1020 na condição normalizada. Os resultados de V_L = 5860,7 m/s e V_T = 3223,4 m/s estão próximos dos valores de referência (também apresentados na Tabela 2), sendo constatadas pequenas diferenças inferiores a 0,65% [14, 15]. Entretanto, é importante ressaltar que nos estudos realizados por [14] e [15] a condição de tratamento térmico do aço 1020 não foi informada.

Tabela. 6: Valores de V_L e V_T calculados para o aço 1020

Medida	Tempo (10^{-6} *s*)	V_L (*m/s*)	$V_T = 0{,}55V_L$ (*m/s*)
1	34,80	5792,82	3186,05
2	34,40	5860,17	3223,09
3	34,00	5929,12	3261,02
Média	**34,40**	**5860,70**	**3223,39**
Desvio	**0,33**	**55,65**	**30,60**
$V_L = c/t$, c = comprimento da barra e t = tempo (*s*)			

3.3 Propriedades elásticas para o aço 1020

Na Tabela 7 estão apresentadas as propriedades elásticas calculadas em função de ρ e dos valores médios de V_L e V_T, bem como os valores de referência relatados na literatura e as diferenças percentuais.

Tabela. 7: Valores calculados das propriedades elásticas

Propriedade medida		Valor de referência	Diferença (%)
Tempo (10^{-6} s)	34,40	-	-
ρ (kg/m³)	7860,49	7860	0,00
Propriedade calculada		**Valor de referência**	**Diferença (%)**
V_L (*m/s*)	5860,70	5890,00	0,50
V_T (*m/s*)	3223,39	3240,00	0,51
G (GPa)	81,68	80,00	2,10
E (GPa)	209,62	210,98	0,64
K (GPa)	161,11	138 - 179	0,00
Z ($10^6 kg/m^2.s$)	46,07	45,56	1,12
r	0,95	0,90 - 1,20	0,00
v	0,28	0,28 - 0,30	0,00

O módulo de cisalhamento (*G*) é um importante parâmetro para a investigação do comportamento elástico do material solicitado mecanicamente pela seção transversal. No aço 1020, o valor do módulo *G* encontra-se em torno de 80 GPa [24]. Alguns autores demonstraram a utilização de V_L e V_T para determinação do módulo *G* em diferentes tipos de aço carbono, sendo encontrado um valor médio em torno de 82,10 GPa para o aço 1020 [21]. No presente estudo foi calculado para o aço 1020 um valor de *G* = 81,68 GPa, sendo esse resultado compatível com os valores de referências.

O valor do módulo de elasticidade (*E*) permite investigar a relação de proporcionalidade existente entre os valores de tensão e deformação nos materiais submetidos ao ensaio de tração [3]. Para a maioria dos aços com baixo teor de carbono o módulo *E* está entre 150 e 220 GPa [3, 25]. Outros autores adotam de maneira geral para os aços o valor de *E* = 200 GPa [26]. Para o aço 1020 investigado com ondas ultrassônicas os valores de *E* podem variar entre 210 a 212 GPa [21]. No presente estudo, o resultado calculado foi de *E* = 209,62 GPa.

O módulo de compressibilidade (*K*) representa a rigidez à deformação volumétrica do material. Dados publicados no Website da mydatabook.org (http://www.mydatabook.org/solid-mechanics/bulk-modulus/) mostraram que o valor do módulo *K* dos aços pode variar de 138 GPa a 179 GPa, dependendo da condição de processamento e tratamento térmico. Por exemplo, o aço 1020 na condição laminado apresenta um valor de *K* igual a 140 GPa [24]. No presente estudo encontrou-se para o aço 1020 normalizado o valor de 161,11 GPa, estando este resultado dentro da faixa de valores esperados para os aços carbono, independente da condição de tratamento térmico.

A impedância acústica (*Z*) representa a oposição à passagem da energia acústica através de um material, sendo esta propriedade calculada pelo produto entre a densidade e a velocidade longitudinal. O valor de *Z* encontrado para o aço 1020 por meio de medidas ultrassônicas é de aproximadamente 45,56 x 10^6 kg/m²s

[8]. No presente estudo foi obtido um resultado próximo ao valor de referência, em que $Z = 46{,}17 \times 10^6$ kg/m²s.

Para materiais perfeitamente isotrópicos admite-se que o valor do fator de anisotropia (*r*) é igual a 1 [27]. O valor de $r = 1$ também é adotado para os aços normalizados, mesmo conhecendo as dificuldades de se produzir um aço perfeitamente isotrópico. Entretanto, para projetos de engenharia onde se deseja determinar com precisão o valor de anisotropia, pode-se encontrar valores de *r* que variam entre 0,9 e 1,2 para aços de alta resistência e baixo teor de carbono [28]. Assim, o resultado encontrado de $r = 0{,}95$ sugere que o aço 1020 normalizado se apresenta como um material de tendências isotrópicas, estando de acordo com o esperado para um aço com baixo teor de carbono.

O coeficiente de Poisson (*v*) representa a razão entre as deformações transversal e longitudinal. Para a maioria dos aços o coeficiente de Poisson assume o valor de $v = 0{,}30$ [26]. Entretanto, dependendo da temperatura ambiente o coeficiente de Poisson pode variar entre 0,28 a 0,29 [29]. Logo, o valor de $v = 0{,}28$ calculado para o aço 1020 está de acordo com o esperado.

3.4 Propriedades mecânicas para o aço 1020

A partir da Equação 11 para aços ASTM A36, tentou-se estimar o *LRT* do aço 1020 com o valor médio calculado de V_L. O resultado encontrado de *LRT* = 447,81 MPa foi próximo do valor de referência (*LRT* = 440 MPa) apresentado no catálogo técnico do fornecedor da barra de aço 1020 [13]. O resultado também concorda o valor de *LRT* = 440,85 MPa obtido no ensaio de tração. Logo, a Equação 11, que utiliza o valor de V_L para calcular o *LRT* dos aços ASTM A36, pode ser utilizada para a estimativa do *LRT* do aço 1020 normalizado.

Para investigar a dureza do aço 1020 foi utilizada a Equação 12, a qual foi obtida depois de verificar em perfis de aços as relações existentes entre *LRT* e *HV* [18]. Neste caso, utilizando o valor de *LRT* = 447,81 MPa encontrou-se uma dureza de 139,12 *HV*. Sabe-se que os valores de dureza *HV* e *HB* podem ser facilmente relacionados, podendo ainda os valores de dureza na faixa entre 100 e 1000 *HV* assumirem valores idênticos aos de dureza *HB* [30]. Logo, a dureza calculada para o aço 1020 pode assumir o valor de 139,12 *HB*, sendo o valor de referência no catálogo da barra igual a 131 *HB* [13]. O valor obtido com o ensaio de dureza foi de 127 *HB*. Portanto, o valor medido se aproximou mais do valor de referência, quando comparado com o valor calculado com a Equação 12. Utilizando o valor *LRT* = 447,81 MPa na Equação 14, encontra-se uma dureza de 129,80 *HB*. Esse resultado também é mais próximo do valor medido do que aquele calculado com a Equação 12.

Utilizando a Equação 13 para o cálculo da tensão de escoamento (σ_e) encontrou-se um valor de σ_e = 284,63 MPa, para uma dureza de 129,80 *HB*. O valor de σ_e aumenta para 310,13 MPa, quando se admite uma dureza de 139,12 *HB*. Com o ensaio de tração foi obtido um resultado de σ_e = 304,26 MPa, concordando com os valores calculados e com o valor de σ_e = 300 MPa observado no aço 1020 normalizado [31]

Para o cálculo do módulo de resiliência (u_r) foram utilizados na Equação 15 os valores de σ_e = 284,63 MPa e *E* = 209,62 GPa. O resultado de u_r = 0,193 N.mm/mm³ corresponde ao esperado para os aços com baixo teor de carbono, cujo valor de referência é de 0,182 N.mm/mm³ [3]. Admitindo que o valor de σ_e = 310,13 MPa seja utilizado na Equação 15, o resultado de u_r aumenta de 0,193 para 0,229 N.mm/mm³. Nesse caso, o resultado se aproxima do valor de referência para os aços com médio teor de carbono [27]. Portanto, o valor σ_e = 310,13 MPa calculado com o maior valor de dureza (139,12 *HB*) foi desconsiderado nesse estudo para a análise do módulo de resiliência (u_r).

IV. CONCLUSÃO

Os resultados desse estudo permitiram concluir que o sistema eletrônico de ultrassom pode ser utilizado para determinar os valores das velocidades de ondas ultrassônicas propagadas através de uma barra de aço 1020. Este fato foi constatado após comparar os resultados de V_L e V_T com os valores de referência para o aço 1020.

Os valores calculados para o coeficiente de Poisson (*v*), módulo de elasticidade (*E*), módulo de compressibilidade (*K*) e índice de anisotropia (*r*), se apresentaram dentro das faixas esperadas para o aço 1020. Para o módulo de cisalhamento (*G*), apenas uma pequena diferença de 2,10% foi encontrada em relação ao valor de referência.

Com as relações matemáticas descritas em função de V_L foram encontrados valores de σ_e = 284,63 MPa, *LRT* = 447,81 MPa e dureza = 129,80 *HB*. Esses valores estão próximos dos resultados obtidos com os ensaios mecânicos convencionais realizados. Isto sugere que as relações matemáticas aplicadas nesse estudo se adequam para a caracterização mecânica do aço 1020.

O valor do módulo de resiliência (u_r), em torno de 0,193 N.mm/mm³, também foi muito próximo daquele encontrado para os aços com baixo teor de carbono. O resultado indica uma boa proximidade na estimativa das propriedades σ_e e *E*, obtidas a partir de V_L, V_T e ρ.

A similaridade entre os resultados encontrados e os valores de referência, associado à simplicidade do método

proposto, corroboram a viabilidade de utilização do método ultrassônico da transparência como técnica não destrutiva para caracterização das propriedades elásticas e mecânicas do aço 1020.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas (PPGMCS), pela utilização da infraestrutura e equipamentos.

REFERÊNCIAS

[1] Krautkramer, J. & Krautkramer, H. (1990). *Ultrasonic testing of materials* (4th ed.) Berlin: Springer-Verlag.

[2] Andreucci, R. (2014). *Ensaio por ultrassom*. São Paulo: Abendi.

[3] Garcia, A., Spim, J. A. & Santos, C. A. (2014). *Ensaio dos materiais*. Rio de Janeiro: LTC.

[4] Rodríguez-Sastre, M. A., & Calleja, L. (2006). The determination of elastic modulus of slates from ultrasonic velocity measurements. *The Geological Society of London*. *IAEG, 775*, 1-11.

[5] Hamidnia, M., & Honarvar, F. (2013). Measurement of elastic properties of AISI 52100 alloy steel by ultrasonic nondestructive methods. *Journal of Mechanics of Materials and Structures, 7*(10), 951–961. doi:10.2140/jomms.2021.7.951

[6] Yamagishi, H., Fukuhara, M., & Chiba, A. (2010). Determination of the mechanical properties of extruded pure magnesium during tension–tension low-cycle fatigue using ultrasonic testing. *Materials Transactions, 51*(11), 2025-2032. doi:10.2320/matertrans.m2010188

[7] Wiskel, J. B., Kennedy, J., Ivey, D. G., & Henein, H. (2015). Ultrasonic velocity evaluation of three grades of heat treated steel. *Department of Chemical and Materials Engineering, University of Alberta, Canada.*

[8] Ginzel, E., & Turnbull, B. (2016). Determining approximate acoustic properties of materials. *NDT. net Dec*. Recuperado de http://www.ndt.net/?id=20452

[9] de Oliveira, M. X. (2020). Correlação entre ultrassom e dureza em liga de alumínio-silício A356 fundida e tratada termicamente, *Revista Eletrônica de Materiais e Processos, 15*(2), 71-80.

[10] Fonseca, E., & Reguly, A. (2011). The use of the ultrasound measurement technique for the evaluation of mechanical properties of the ASTM A36 steels. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 33*(2), 212-217.

[11] Assef, A. A., Maia, J. M., Gewehr, P. M., Gamba, H. R., Costa, E. T., & Button, V. L. (2009). Sistema para geração, aquisição e processamento de sinais de ultra-som. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica, 20*(2), 145-155.

[12] Carvalho, A. C. N. M. (2020). *Estimativa das propriedades elásticas de ligas metálicas não ferrosas por meio do método ultrassônico da transparência* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas - PPGMCS, Universidade Estadual de Montes Claros, Montes Claros, MG, Brasil.

[13] Gerdau. (2003). *Manual de aços: aços planos e suas aplicações*. Recuperado de https://www2.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais

[14] Olympus. (2020). *Material Sound Velocities*. Recuperado de https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/thickness-gauge/appendices-velocities/

[15] Gür, C. H., & Keles, Y. (2003). Ultrasonic characterization of hot rolled heat treated steels. *Materials Characterisation, 45*(9), 615-620.

[16] Carvajal, L., Artigas, A., Monsalve, A., & Arévalo, E. (2017). Monitoring heat treatments in steels by a non destructive ultrasonic method. *Materials Research, 20*, 347-352. doi:10.1590/1980-5373-mr-2016-1083

[17] Hwa, L. G., Lee, T. H., & Szu, S. P. (2004). Elastic properties of lanthanum aluminosilicate glasses. *Materials Research Bulletin, 39*(1), 33-40.

[18] Fujita, M., & Masuda, T. (2014). Application of various NDT methods for the evaluation of building steel structures for reuse. *Materials, 7*(10), 7130-7144. doi:10.3390/ma7107130

[19] Fujita, M., & Kuki, K. (2016). An evaluation of mechanical properties with the hardness of building steel structural members for reuse by NDT. *Metals, 6*(10), 247. doi:10.3390/met6100247

[20] EUN, T. J.-C. (2020). Handbook of engineering practice of materials and corrosion. Houston USA: Springer, p. 329. doi:10.1007/978-3-030-36430-4

[21] Freitas, V. L. de A., Albuquerque, V. H. C. de, Silva, E. de M., Silva, A. A., & Tavares, J. M. R. S. (2010). Nondestructive characterization of microstructures and determination of elastic properties in plain carbon steel using ultrasonic measurements. *Materials Science and Engineering A, 527*(16-17), 4431–4437. doi:10.1016/j.msea.2010.03.090

[22] Meza, C. A., Franco, E. E., & Ealo J. L. (2019). Implementation of the ultrasonic through-transmission technique for the elastic characterization of fiber-reinforced laminated composite. *Dyna, 86*(208), 153-161. doi:10.15446/dyna.v86n208.70279

[23] Matweb. (2020). Material property data. Recuperado de http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx

[24] Jiangsu. (2020). Jiangsu tiancheng group limited. Recuperado de http://www.steel-tube.com/post/96.html

[25] Kang, F., & Zhong-Ci, S. (1996). *Mathematical theory of elastic structures*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. 9. doi:10.1007/978-3-662-03286-2

[26] Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). *Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução* (8th ed.) Rio de Janeiro: LTC.

[27] de Souza, S. A. (2014). *Ensaios mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos*. (Vol. 5, ed. reimpr.). São Paulo: Edgard Blücher.

[28] Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2009). Manufacturing engineering and technology (6th ed.). Upper Saddle River: Prentice Hall.

[29] Luecke, W. E., McColskey, J. D., McCowan, C. N., Banovic, S. W., Fields, R. J., Foecke, T., … & Gayle, F. W. (2005). Mechanical properties of structural steels. *NIST NCSTAR 1-3D.*

[30] Handbook, M. (1978). *Properties and selection: irons and steels* (9th ed., Vol. 1). American Society for Metals (ASM).

[31] Dewangan, S., Mainwal, N., Khandelwal, M., & Jadhav, P. S. (2019). Performance analysis of heat treated AISI 1020 steel samples on the basis of various destructive mechanical testing and microstructural behaviour. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 1-14. doi:10.1080/14484846.2019.1664212